



中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素

吴昊, 黄瀚蛟, 何宇, 陈文宽

Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China

WU Haoyue, HUANG Hanjiao, HE Yu, and CHEN Wenkuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210204>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国农业碳排放空间格局及影响因素动态研究

Spatial dynamics of agricultural carbon emissions in China and the related driving factors

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1269–1282

四川省环境友好型农业生产效率测算及影响因素研究——基于超效率DEA模型和空间面板STIRPAT模型

Measurements and influencing factors of the efficiency of environmental-ly-friendly agricultural production in Sichuan Province based on SE-DEA and spatial panel STIRPAT models

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1134–1146

中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于SBM-Undesirable模型与面板单位根检验

Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1381–1391

中国农业氨排放的时空演变趋势与减排潜力分析

Space-time evolution of China's agricultural ammonia emission and emission reduction potential

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(9): 1257–1268

中国有机农业的集聚与空间依赖性

Agglomeration and spatial dependence of organic agriculture in China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(3): 440–452

基于三阶段DEA模型的农业生产效率及其时空特征研究——以长江经济带为例

Calculation of agricultural production efficiency based on a three-stage Data Envelopment Analysis model and analysis of the spatial-temporal characteristics: An example from the Yangtze River Economic Belt

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(7): 1243–1252



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210204

吴昊玥, 黄瀚蛟, 何宇, 陈文宽. 中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(10): 1762-1773

WU H Y, HUANG H J, HE Y, CHEN W K. Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(10): 1762-1773

中国农业碳排放效率测度、空间溢出与影响因素*

吴昊玥^{1,2}, 黄瀚蛟³, 何宇¹, 陈文宽^{1**}

(1. 四川农业大学管理学院 成都 611130; 2. 赫尔辛基大学农业与林业学院 赫尔辛基 00014;

3. 西北农林科技大学林学院 杨凌 712100)

摘要: 准确测度农业碳排放效率并分析关键影响因素, 可为加快实现农业减排增效提供理论参考。已有研究未将碳排放与其他要素的共同作用进行分离, 研究实质为碳排放约束下的农业生产效率, 而非农业碳排放效率。为完善既有测算思路, 本文在农业全要素框架下搭建碳排放效率的理论模型, 基于 GB-US-SBM 模型测算 2000—2019 年间中国 30 省(市、自治区)的农业碳排放松弛量, 根据碳排放松弛量与实际值计算农业碳排放效率。在此基础上, 从产业、要素、环境 3 个方面出发, 采用空间杜宾模型探讨农业碳排放效率的影响因素与溢出效应。结果表明: 研究期内中国农业碳排放效率均值为 0.778, 具有较大减排潜力。省级层面上, 仅内蒙古和青海两地的农业碳排放效率达 1.000, 其余地区均存在不同规模的减排空间; 根据总量与效率的双重特征, 将 30 省(市、自治区)分为高排高效区、低排高效区、高排低效区和低排低效区。中国农业碳排放效率全局 Moran's *I* 显著大于 0 ($P < 0.01$), 说明效率整体存在空间自相关性。空间杜宾模型结果显示, 农业碳排放效率具有显著的正向溢出效应, 表明邻近地区间的效率呈良性互动的演进特征。就直接效应而言, 本省的农业产业结构、农业投资强度、财政支农力度和受灾程度对本省农业碳排放效率存在负向影响, 有效灌溉率和城镇化率则表现为正向作用。从溢出效应来看, 邻近地区的受灾程度将负向影响本省农业碳排放效率, 而城镇化率则呈积极影响。研究结果可为我国分区域、分类别推进低碳农业发展提供理论依据。

关键词: 农业碳排放效率; 全局参比; GB-US-SBM 模型; 空间杜宾模型; 空间溢出

中图分类号: F323

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Measurement, spatial spillover and influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency in China*

WU Haoyue^{1,2}, HUANG Hanjiao³, HE Yu¹, CHEN Wenkuan^{1**}

(1. College of Management, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki, Helsinki 00014, Finland; 3. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The efficiency of agricultural carbon emissions is a bridge between crop production and emission reduction, acting as a critical indicator of the potential for emission mitigation in agricultural production. In previous estimations, the outcomes yield the input-output efficiency of agriculture under the carbon emission constraint, rather than the efficiency of agricultural carbon emission,

* 国家自然科学基金项目(71704127)和四川省社会科学研究“十三五”规划项目(SC18TJ018)资助

** 通信作者: 陈文宽, 主要研究方向为资源配置与可持续利用。E-mail: 11454@sicau.edu.cn

吴昊玥, 主要研究方向为农业碳排放。E-mail: wuhaoyue@sicau.stu.edu.cn

收稿日期: 2021-04-05 接受日期: 2021-06-03

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (71704127) and Sichuan Provincial Social Science Research “13th Five-Year Plan” Project (SC18TJ018).

** Corresponding author, E-mail: 11454@sicau.edu.cn

Received Apr. 5, 2021; accepted Jun. 3, 2021

due to failing to separate the contribution of carbon emissions from other factors. To optimize the existing idea and understand the efficiency more precisely, a theoretical framework and a corresponding equation were developed for analysis in this study. In agricultural production, given the input factors, the efficiency of agricultural carbon emissions under the prerequisite of no desirable output was defined as the ratio of the minimum possible emissions to the actual emissions. On this basis, the GB-US-SBM model was employed to calculate the slack of emissions in 30 Chinese provinces from 2000 to 2019, reflecting the distance between the actual emission and production frontier. Then, the efficiency was estimated based on the slacks and actual emissions. Finally, the influencing factors and spillover effects of agricultural carbon emissions efficiency were explored using the spatial Durbin model. Results showed that: (1) From 2000 to 2019, the average agricultural carbon emissions efficiency was 0.778 in China, indicating considerable potential for emission reduction. At the provincial level, only Inner Mongolia and Qinghai had an efficiency of 1.000, while the rest of the provinces had different spaces for emission mitigation. (2) According to the emissions quantity and efficiency, the 30 provinces were divided into four groups. The five provinces, Henan, Hebei, Shandong, Heilongjiang, and Guangxi, belonged to a group of high emissions with high efficiency. The group of low emissions with high efficiency accounted for the majority, including 12 provinces, such as Inner Mongolia and Gansu. The group with high emissions and low efficiency covered seven provinces, such as Hunan and Hubei. Six provinces, including Zhejiang and Fujian, were classified as low emissions with low efficiency. (3) The global Moran's index was significantly greater than 0, with a *P*-value under 0.01, verifying that there was a positive spatial autocorrelation in the provinces. The spatial econometric regression showed that efficiency had a significant positive spatial spillover effect, suggesting that an interactive evolution existed among close provinces. Specifically, four factors—industry structure, investment intensity, financial support for agriculture, and the degree of disaster, harmed the agricultural carbon emissions efficiency directly. By contrast, the irrigation effectiveness and urbanization indicated significant positive effects. In terms of spillover effects, the intensity of a disaster in a province negatively affected the efficiency of agricultural carbon emissions in neighboring provinces, while the urbanization rate exhibited a positive effect. Hence, it was essential to pay attention to the key factors that influence efficiency. Making full use of spillover effects could also help in achieving regional agricultural low-carbon transition. Additionally, local solutions should be addressed, owing to the regional characteristics of efficiency. This study results could provide a theoretical basis for the development of low-carbon agriculture in China.

Keywords: Agricultural carbon emissions efficiency; Global benchmark; GB-US-SBM; Spatial Durbin model; Spatial spillover

气候暖化是经济高速发展伴随而来的环境后果,已成为全人类共同面临的威胁。作为继工业之后的第二大温室气体排放源,农业的碳排放量已高达全球人为排放总量的 23%^[1],减排行动责无旁贷。农业碳减排要求在既定投入要素下保证期望产出并削减冗余碳排放,要实现这一目标,客观上要求对农业生产系统的碳排放效率进行科学测度,即以理论上可达到的最小碳排放量与实际排放量进行比较,进而判断排放效率的高低和减排潜力的大小^[2]。在此基础上,通过探讨效率的关键影响因素,可准确把握各地区农业碳排放效率改进方向与程度。源于差别迥异的资源禀赋,中国各地区已形成多元化和地域性的生产方式,导致农业碳排放效率差距明显;而区域内部生产环境整体相似,发展起点较为相近,可能导致农业碳排放效率产生空间关联,为邻近地区协同改进效率提供了基础条件。因此,准确测度农业碳排放效率,探索宏观层面的关键影响因素,探讨可能存在的溢出效应并探寻协同改善路径,是推进农业低碳转型、提质增效的重要依据。

作为衔接经济产出与碳排放量的桥梁,碳排放效率的研究意义逐渐引起学界重视。Zhou 等^[3]、王群伟等^[4]学者认为碳排放效率是指:在既定投入要素

和经济产出条件下,理论上可达到的最少碳排放与实际排放之比。基于这一思路,学者们陆续采用 DEA 模型或 SFA 方法在全要素生产框架下对全局、工业碳排放效率展开测度^[5-6],通常将资本、劳动力和能源作为投入,以 GDP 和碳排放为产出,如:王少剑等^[7]采用超效率 SBM 模型评价 1992—2013 年全国 283 个城市的碳排放绩效;张伟等^[8]运用环境方向距离函数和 DEA 模型测度了 1995—2010 年中国 30 个省区的全要素碳减排效率;刘婕等^[9]同样以 1995—2010 年中国 30 省为研究范围,运用产出距离函数与超越对数生产函数测算了全要素碳排放效率。近年来,农业碳排放核算体系趋于成熟,为农业碳排放效率的测度提供了数据支撑。吴贤荣等^[10]基于 DEA-Malmquist 指数对 2000—2011 年中国 31 个省(市、区)的农业碳排放效率变动趋势进行分析,并探讨了效率指数及其分解指数的省域差异及变动趋势;Lin 等^[11]同样采用 DEA-Malmquist 指数测算了 2003—2010 年中国农业碳排放绩效;高鸣等^[12]应用 Malmquist-luenberger 指数对 1999—2010 年的中国各省区农业碳排放绩效进行测算,发现 12 年间全国绩效有明显提升,但区域间绩效发展状况较不均衡;田云等^[13]以 2011—2017 年间湖北省为研究对象,利用

DEA-Malmquist 分解法测算农业碳排放效率并分析时空差异。也有研究采用 DEA 改进模型,在传统农业生产效率评价体系中增设碳排放指标,尝试将测算结果视作农业碳排放效率,如吴昊玥等^[14]采用 SBM-Undesirable 模型,对 2000—2014 年中国 30 省(市、自治区)的农业碳排放绩效进行测度,发现各地绩效存在显著差异;还有学者聚焦于农业碳汇功能,如李波等^[15]将农业净碳汇看作一种期望产出,运用 DEA-BCC-I 模型测算了 2005—2017 年中国 30 省区的农业净碳汇效率,发现效率整体偏低且空间差异明显。基于测算结果,学者们针对区域差异^[16-17]、收敛性^[12,14]及影响因素^[10,13,15]等方面,对农业碳排放效率的衍生问题展开了广泛探讨。

现有研究对于理解农业碳排放效率具有重要启发和借鉴意义,但截至目前,农业领域的研究和全局与工业领域相比仍相对较少,并存在一些缺憾:从测算思路来看,绝大多数研究均在农业投入产出指标体系中加入碳排放指标,直接将碳排放约束下的农业生产效率视作农业碳排放效率,测算结果实质为整个农业生产活动中资本、劳动力、土地等全部要素的综合技术效率,其未能将碳排放与其他要素的共同作用分离开来,无法反映各地农业生产活动中的实际碳排放量与最优水平的差距,将之视作农业碳排放效率有失偏颇^[2]。从指标体系来看,农业生态系统具备较强碳汇功能,理应将其作为生态效益引入指标体系,但绝大多数研究更加关注农业碳源,却忽略了作物系统本身的碳汇能力,指标体系缺乏系统性与全面性。从测算方法来看,现有农业碳排放效率研究方法多为 DEA 改进模型或 Malmquist 指数,但 DEA 模型基于各时期截面构造生产可能集,每个观测时点会形成不同的生产前沿面,效率测算结果缺乏跨期可比性,相关文献对效率所做时序分析的科学性有待商榷;而 Malmquist 指数实质为增长率,仅能反映地区农业碳排放效率的变化情况,难以横向比较地区效率水平及进行原因分析。在效率的影响因素分析上,现有研究普遍采用普通面板回归方法,将邻近地区间可能存在的交互作用抽象化,导致计量结果存在一定偏差^[18],难以准确把握农业碳排放效率的实际影响因素。

为对现有农业碳排放效率测算思路进行修正,本研究在农业全要素生产框架下搭建农业碳排放效率理论模型,除了考虑传统投入产出指标之外,还将农业碳汇视作农业生产活动的生态效益,以兼顾农业生态系统的碳效应双重性。在此基础上,采用考

虑非期望产出的全局参比 SBM 模型 (GB-US-SBM) 计算农业生产过程中的碳排放松弛量,将 2000—2019 年中国 30 省(市、自治区)所有决策单元一并纳入生产前沿面的构造过程,使得各年测算结果具有跨期可比性,再根据农业碳排放实际值与松弛量计算农业碳排放效率,对效率结果展开探讨。最后,从产业、要素、环境 3 个维度探讨农业碳排放效率的影响因素。区别于普通面板回归,本研究将空间计量模型引入效率影响因素分析中,将可能存在的空间效应纳入研究框架,使计量结果更加符合客观实际。通过理论模型分析、效率测算及影响因素分析,以期对农业碳排放效率的深入研究提供边际贡献,也为我国加快推进低碳农业发展进程提供理论参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 农业碳排放效率理论模型构建

参考碳排放效率的概念^[3-4],本文将农业碳排放效率定义为:在既定期望产出和投入要素条件下,农业生产活动可能实现的最小碳排放量与实际排放量之比,实际排放量越大,农业碳排放效率越低。这一概念也可间接反映既定产出与投入下生产单元的碳排放量最大可能削减率。作为农业生产中不可避免的副产品,碳排放可被视为一种非期望产出,沿用 Färe 等^[19]和 Zhou 等^[20]学者的思想,构建农业碳排放效率理论模型,如图 1 所示。

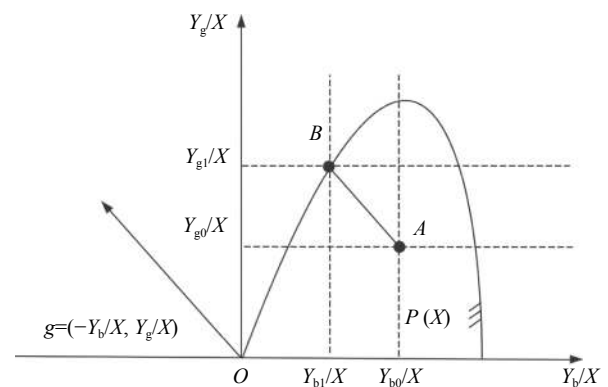


图 1 基于非期望产出思想的农业碳排放效率理论模型
Fig. 1 Theoretical model of agricultural carbon emissions efficiency under the perspective of undesirable output

X : 投入; $P(X)$: 生产可能性的集合; Y_g : 期望产出; Y_b : 非期望产出; $g = (-Y_b/X, Y_g/X)$: 预期产出方向; $A(Y_b0/X, Y_g0/X)$: 某一时刻的产出决策点; $B(Y_b1/X, Y_g1/X)$: A 在生产前沿面上的投影点。 X is the input; $P(X)$ is the production possibilities set; Y_g is the desirable output; Y_b is the undesirable output; $g = (-Y_b/X, Y_g/X)$ denotes the expected output direction; $A(Y_b0/X, Y_g0/X)$ is the decision point of output; $B(Y_b1/X, Y_g1/X)$ is the projection point of point A on the production frontier.

在农业生产过程中,投入一定劳动、耕地、机械等生产要素后,将获得期望产出(如农业产值),同时伴随非期望产出(如农业碳排放)的产生。图 1 中,假设投入用 X 表示, $P(X)$ 为生产可能性的集合,曲线表示生产可能边界,横、纵轴依次为单位投入要素对应的碳排放产出、期望产出,预期产出方向为 $g=(-Y_b/X, Y_g/X)$,即尽量增加农业产值而减少碳排放。

给定投入组合, $A(Y_{b0}/X, Y_{g0}/X)$ 为某一时刻的产出决策点,偏离生产前沿面,属于非效率点,可通过改进要素组合达到生产前沿。根据预期产出方向, $B(Y_{b1}/X, Y_{g1}/X)$ 为 A 在生产可能边界上的投影点, A 与 B 的农业生产效率差距源于潜在期望产出与冗余碳排放量两方面。将视点聚焦到农业碳排放上, Y_{b1}/X 是现有投入禀赋与技术条件下农业生产过程的最小碳排放量,此时, A 可削减的碳排放为 $\delta Y_b/X = Y_{b0}/X - Y_{b1}/X$, 农业碳排放效率 $E = Y_{b1}/Y_{b0}$ 。

1.2 基于 GB-US-SBM 模型的农业碳排放效率测算

在农业全要素生产框架下,农业碳排放效率的测算步骤为:首先,构造包含投入、期望产出和非期望产出的农业生产可能性集(PPS);再基于生产前沿选择合适模型测算出实际产出与理论产出的距离(农业碳排放松弛量);最后,根据前文理论分析构建数学式,算得每个决策单元(DMU)的农业碳排放效率。

由于每个时期的生产可行性集存在差异,基于不同时点生产前沿测度的效率缺乏可比性。为此, Pastor 等^[21]提出全局参比思路,利用整个样本考察期内全部决策单元的投入与产出数据构建最佳生产前沿并作为统一基准,每个决策单元与最佳生产前沿进行比较得到效率值,从而使得效率具有跨期可比性。Tone^[22]提出的 SBM 方向性距离函数模型是一种非径向、非角度的 DEA 模型,不仅能使投入或产出松弛量按照不同比例进行缩减或扩张,还将环境约束作为非期望产出纳入效率测度模型中,能够分解测算出碳排放的效率值。参考 Huang 等^[23]、全良等^[24]的做法,进一步构造考虑非期望产出的全局 SBM 模型,即 GB-US-SBM 模型:

将各省份农业生产系统作为决策单元,假设共有 $T(t=1, \dots, T)$ 个时期与 N 个决策单元(DMU),每个单元利用 m 种投入可生产出 s_1 种期望产出与 s_2 种非期望产出。对于第 k 个 DMU _{k} ,其投入、期望产出及非期望产出向量分别记为 x_k^t 、 $y_k^{g,t}$ 和 $y_k^{b,t}$ 。在规模报酬不变(CRS)假设条件下,构造的生产可能性集见表达式(1),考虑非期望产出的全局 SBM 模型见表达式(2)~(6)。

$$PPS = \left\{ (\bar{x}, \bar{y}^g, \bar{y}^b) \mid \bar{x}^t \geq \sum_{\tau=1}^T \sum_{j=1}^N (\lambda_j^t \times x_j^\tau); \bar{y}^{g,t} \leq \sum_{\tau=1}^T \sum_{j=1}^N (\lambda_j^t \times y_j^{g,\tau}); \bar{y}^{b,t} \geq \sum_{\tau=1}^T \sum_{j=1}^N (\lambda_j^t \times y_j^{b,\tau}), \lambda \geq 0 \right\} \quad (1)$$

$$\rho_k^{G^r,t} = \min \frac{1 + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{s_{ik}^t}{x_{ik}^t}}{1 - \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} \frac{s_{rk}^{g,t}}{y_{rk}^{g,t}} + \sum_{q=1}^{s_2} \frac{s_{qk}^{b,t}}{y_{qk}^{b,t}} \right)} \quad (2)$$

$$s.t. \ x_k^t - \sum_{j=1}^N \sum_{\tau=1}^T (\lambda_j^t \times x_j^\tau) + s_k^t = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^N \sum_{\tau=1}^T (\lambda_j^t \times y_j^{g,\tau}) - y_k^{g,t} + s_k^{g,t} = 0 \quad (4)$$

$$y_k^{b,t} - \sum_{j=1}^N \sum_{\tau=1}^T \lambda_j^t y_j^{b,\tau} + s_k^{b,t} = 0 \quad (5)$$

$$\lambda_j^t \geq 0, s_k^t \geq 0, s_k^{g,t} \geq 0, s_k^{b,t} \geq 0 \quad (6)$$

式中: $\rho_k^{G^r,t}$ 表示目标函数值, x_k^t 、 $y_k^{g,t}$ 和 $y_k^{b,t}$ 依次为第 k 个 DMU 在 t 时期的投入、期望产出及非期望产出, x_j^τ 、 $y_j^{g,\tau}$ 、 $y_j^{b,\tau}$ 和 λ_j^t 依次为第 j 个 DMU 在 τ 时期的投入、期望产出、非期望产出和权重向量, s_i 、 s_i^g 和 s_i^b 分别为投入、期望产出和非期望产出的松弛变量。本研究中非期望产出仅有农业碳排放,借鉴 Hu 等^[25]、刘华军等^[26]测算全要素水资源效率和化肥效率的方法,构建农业碳排放效率的测算等式:

$$E_k^t = \frac{y_k^{b,t} - s_k^{b,t}}{y_k^{b,t}} \quad (7)$$

式中: E_k^t 、 $y_k^{b,t}$ 、 $s_k^{b,t}$ 分别表示 t 时期第 k 个 DMU 的农业碳排放效率、农业碳排放实际量和农业碳排放松弛量。 E_k^t 的取值区间为 $[0, 1]$; 若 $s_k^{b,t}$ 等于 0, 则农业碳排放效率等于 1。

对于农业生产系统中投入、期望产出和非期望产出的设定,参考李谷成^[27]的研究,考虑农业生产过程中的劳动、土地、化肥、机械及灌溉 5 类投入,将农业总产值及农业碳吸收量作为期望产出,农业碳排放量作为非期望产出,构建投入产出指标体系(表 1)。

表 1 中,农业碳排放与碳吸收量无法直接从现有资料中获取,需进行核算。农业碳排放主要涉及 4 类排放源:一是农资投入,包括化肥、农药、农膜、柴油使用及灌溉耗费电能而产生的碳排放;二是稻

表 1 全要素框架下的农业生产投入产出指标体系
Table 1 Input-output indicators of agricultural production under the total-factor framework

指标类型 Type of indicator		具体指标 Specific indicators	单位 Unit
投入 Inputs	劳动力 Labor	农业从业人数 Quantity of agricultural employees	persons
	土地 Land	耕地面积 Cropland area	hm ²
	机械 Machine	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery	kW
	灌溉 Irrigation	农业灌溉用水总量 Total water used for irrigation	m ³
	肥料 Fertilizer	化肥施用量 Total fertilizer application	t
产出 Output	期望 Desirable	经济产出 Economic output	CNY
		生态产出 Ecologic output	t
	非期望 Undesirable	环境代价 Environmental cost	t
		农业碳排放量 Agricultural carbon emissions	t

田甲烷菌利用水稻根部有机物质转化产生 CH₄; 三是土壤氧化亚氮排放; 四是秸秆燃烧产生的碳排放。计算方法与排放系数参考 IPCC^[28]、闵继胜等^[29]、程琳琳^[30]的研究。农业碳吸收主要考虑各类作物通过光合作用吸收并固定的碳, 计算公式和系数赋值参考田云等^[31]的研究成果。计算时, 将 CH₄、N₂O 统一折算为标准碳, 便于后续分析。

1.3 农业碳排放效率溢出效应及影响因素分析

厘清农业碳排放效率的影响因素是把握优化方向的重要前提。由于农业碳排放效率可能具有空间相关性, 影响因素分析需引入空间计量方法。目前, 普遍应用的 3 种模型为空间滞后 (SAR)、空间误差 (SEM) 以及空间杜宾 (SDM)。其中, SDM 是 SAR 和

SEM 相结合的一般形式, 因此以 SDM 作为基础模型, 如式 (8) 所示:

$$Y = \rho WY + \beta X + \theta WX + \alpha + \varepsilon \quad (8)$$

式中: Y 表示农业碳排放效率; ρ 、 β 、 θ 为回归系数向量; W 为空间权重矩阵, 权重值为每两省份地理中心点的距离平方倒数; X 是解释变量向量, 即农业碳排放效率的可能影响因素; α 、 ε 分别是常数项、随机干扰项。若 $\theta=0$, 且 $\rho \neq 0$, 则 SDM 可以简化为 SAR; 若 $\rho\beta + \theta = 0$, 则 SDM 可简化为 SEM; 对此采用 Wald 检验和 LR 检验加以判断。

本研究从产业、要素、环境 3 个维度出发, 引入可能的影响因素 (表 2)。

表 2 农业碳排放效率影响因素变量说明及描述性统计分析
Table 2 Description and statistical analysis of factors influencing the efficiency of agricultural carbon emissions

变量 Variable	符号 Symbol	计算方法 Calculation	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum	最大值 Maximum
产业 Industry	农业产业结构 Agro-industrial structure	ind 农业总产值/农林牧渔总产值 Total agricultural output value / total agricultural, forestry, livestock husbandry and fishery output value	0.524	0.086	0.339	0.740
	作物种植结构 Crop structure	cro 粮食种植面积/作物播种面积 Grain sown area / crop sown area	0.659	0.130	0.354	0.971
	产业集聚程度 Degree of industrial agglomeration	agg 参考文献[32] Reference [32]	1.191	0.635	0.043	4.209
要素 Factor	耕地规模化程度 Scale of cropland	lan 耕地面积/农业从业人数 Cropland area/quantity of agricultural employees (hm ² ·capita ⁻¹)	0.499	0.386	0.104	2.812
	农业投资强度 Agricultural investment intensity	cap 农业固定资产投资/耕地面积 Investment in agricultural fixed assets / cropland area (10 ⁴ ¥·hm ⁻²)	0.241	0.414	0.001	3.618
	农技人员密度 Density of agricultural technicians	tec 农业技术人员/耕地面积 Agricultural technicians / cropland area (persons·hm ⁻²)	0.008	0.004	0.002	0.025
	有效灌溉率 Effective irrigation rate	irr 有效灌溉面积/耕地面积 Effective irrigated area / cropland area	0.561	0.227	0.203	1.000
环境 Environment	农业受灾程度 Extent of agricultural disaster	dis 受灾面积/农作物播种面积 Agricultural disaster area / crop sown area	0.238	0.162	0.002	0.936
	城镇化率 Urbanization rate	常住人口城镇化率 Urbanization rate of resident population	0.448	0.273	0.100	0.901
	财政支农力度 Financial support for agriculture	fis 农林水务支出/财政总支出 Agricultural financial expenditure / total financial expenditure	0.089	0.041	0.012	0.190

1.4 数据来源及处理

研究需要 2000—2019 年中国 30 省(市、自治区)的农业碳排放、碳吸收量核算所涉活动数据、农业生产系统投入产出指标和影响因素变量数据,源于历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国水利统计年鉴》和各省统计年鉴。港、澳、台、西藏数据缺失严重,难以纳入研究范围。此外,按 2000 年可比价对各年产值及投资指标进行折算,以剔除价格因素干扰。

2 实证分析

2.1 中国农业碳排放效率测算

2.1.1 中国农业碳排放效率

如前文所述,利用 Maxdea Ultra 8 软件构建 GB-US-SBM 模型,在全要素生产框架下算得各年各省农业碳排放松弛量,再根据式(3)计算 2000—2019 年

30 省(市、自治区)农业碳排放效率,按照均值从低至高的顺序将各省区进行排序,结果如表 3 所示。

从均值来看,2000—2019 年,中国农业碳排放效率平均水平为 0.778,表明在对应技术水平与投入要素条件下还可减少 22.2% 的农业碳排放量,具备较大减排潜力。从省域层面而言,仅内蒙古和青海两省(自治区)农业生产过程中碳排放量未出现冗余现象,效率达 1.000,这应归因于两地作物种植结构的特征:内蒙古的稻田甲烷排放量与秸秆燃烧排放量均较低,而青海几乎没有水稻种植,加之主要作物的秸秆露天焚烧率低于 10%,这两项碳排放源几乎为零,使得农业碳排放总量相对较低。除内蒙古与青海外,其余所有省份的农业碳排放效率均未达到有效,均值处于 (0.3, 1.0) 的区间内,其中新疆、吉林、北京、河南等 7 省(市、自治区)的效率高于 0.9,山东、甘

表 3 2000—2019 年中国 30 省(市、自治区)主要年份农业碳排放效率

Table 3 Efficiencies of agricultural carbon emissions of 30 provinces (cities, autonomous regions) in China in major years of 2000 to 2019

省(市) Province (city, autonomous region)	2000	2005	2010	2015	2019	年均增长率 Annual growth rate (%)	均值 Mean
湖南 Hunan	0.323	0.312	0.315	0.324	0.346	0.37	0.326
江西 Jiangxi	0.432	0.346	0.338	0.360	1.000	4.52	0.389
湖北 Hubei	0.623	0.473	0.533	0.560	0.519	-0.95	0.539
安徽 Anhui	0.496	0.538	0.567	0.570	0.507	0.11	0.540
福建 Fujian	0.457	0.488	0.562	0.624	0.814	3.08	0.569
浙江 Zhejiang	0.448	0.382	0.476	0.584	1.000	4.32	0.569
广东 Guangdong	0.498	0.538	0.553	0.632	1.000	3.74	0.604
江苏 Jiangsu	0.476	0.490	0.519	0.792	1.000	3.98	0.633
宁夏 Ningxia	0.719	0.715	0.704	0.712	0.733	0.11	0.719
陕西 Shaanxi	0.744	0.771	0.740	0.626	0.868	0.81	0.721
山西 Shanxi	0.742	0.755	0.727	0.747	0.799	0.39	0.758
云南 Yunnan	0.776	0.737	0.706	0.729	0.838	0.40	0.768
四川 Sichuan	1.000	0.751	0.724	0.742	0.811	-1.10	0.773
天津 Tianjin	0.707	0.777	0.701	0.748	1.000	1.84	0.788
辽宁 Liaoning	0.644	0.798	0.711	0.831	1.000	2.34	0.805
重庆 Chongqing	1.000	0.975	0.886	0.751	1.000	0.00	0.863
上海 Shanghai	0.696	0.923	1.000	0.788	0.848	1.04	0.873
海南 Hainan	0.834	0.748	0.685	0.829	1.000	0.96	0.877
贵州 Guizhou	1.000	0.947	0.789	0.828	0.959	-0.22	0.881
甘肃 Gansu	0.996	0.969	0.850	0.797	1.000	0.02	0.890
山东 Shandong	0.958	0.827	0.852	0.916	1.000	0.23	0.891
河北 Hebei	0.927	0.795	0.880	0.933	1.000	0.40	0.911
广西 Guangxi	0.625	1.000	0.887	0.907	1.000	2.50	0.915
黑龙江 Heilongjiang	0.828	0.880	0.920	1.000	1.000	1.00	0.924
河南 Henan	0.937	0.958	0.924	0.933	1.000	0.34	0.942
北京 Beijing	0.898	0.875	0.977	1.000	1.000	0.57	0.950
吉林 Jilin	0.840	1.000	0.901	0.970	1.000	0.92	0.957
新疆 Xinjiang	1.000	0.936	0.965	1.000	1.000	0.00	0.977
内蒙古 Inner Mongolia	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.00	1.000
青海 Qinghai	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.00	1.000
全国 Nationwide	0.754	0.757	0.746	0.774	0.901	0.94	0.778

肃、贵州、海南等 7 省(市、自治区)的效率处于 0.8~0.9, 略优于全国平均水平, 若这些地区在维持现有投入禀赋和技术水平的情形下, 继续加强对农业各环节碳减排的控制, 将从无效转变为有效; 天津、四川、云南、山西等 8 省(市、自治区)的农业碳排放效率处于 0.6~0.8, 说明农业生产系统存在较大减排空间, 需加强碳排放源头控制, 尽量减少排放冗余现象; 湖北、安徽、福建、浙江的农业碳排放效率位于 0.5~0.6, 而湖南、江西的效率均值更是分别低至 0.326 和 0.389, 说明近 50% 甚至超过 50% 的农业碳排放量都是可避免的无效排放。从效率呈现结果来看, 农业碳排放效率较低的地区多为农业大省, 如湖南、湖北等中部农业大省, 其在农业生产中尚未充分兼顾农业产出与环境保护的平衡, 但是, 同样作为农业大省的黑龙江、吉林却拥有高于 0.9 的平均效率, 这或许归因于东北平原优越的农业基础与生产条件。整体而言, 农业碳排放效率所呈现出的差异化、地域化特征, 意味着我国应分区域、分源头推进农业碳减排。

从增长率来看, 全国农业碳排放效率年均增长速度为 0.94%, 呈缓慢上升趋势。20 年间, 除新疆、内蒙古、青海的效率保持不变外, 湖北、四川和贵州 3 省的效率表现为负向增长, 其余 24 省(市、自治区)的农业碳排放效率均存在不同程度的增长, 尤其是江西、浙江和江苏, 增长率分别为 4.52%、4.32% 和 3.98%。表明我国对农资高效利用、低碳农业发展愈发重视, 各地在低碳农业生产技术和废弃物绿色化处理上也已取得显著成绩, 整体处于自高碳农

业向低碳农业的转型阶段。

2.1.2 基于农业碳排放总量与效率双重维度的省区类别划分

为进一步了解各地区农业碳排放效率与总量的关系, 本研究将两项指标置于同一坐标轴中, 以 2000—2019 年总量与效率的平均值为原点, 把 30 个省份划分为低排高效、低排低效、高排高效和高排低效 4 类, 如图 2 所示。

图 2 显示, 河南、河北、山东、黑龙江、广西 5 省属于高排高效区(第 1 象限), 尽管这些地区均为农业大省, 其农业生产过程中会产生较多碳排放, 但因其较为重视投入要素的合理配置与使用, 加之作物生态系统的强大碳汇功能, 使得农业碳排放效率总体较高, 这类地区可作为其他农业大省的发展示范。内蒙古、甘肃、海南等 12 个省区为低排高效区(第 4 象限), 这些地区在农业发展过程中做到了减排与增效的兼顾。相比之下, 湖南、湖北、安徽、广东等 7 省区属于高排低效区(第 2 象限), 其同样表现为较高的碳排放量, 但碳排放效率却不尽人意, 由于这些省份具备碳排放总量基数大与可削减比例高的双重特性, 应被作为农业节能减碳的重点治理区域。最后一类为低排低效区(第 3 象限), 包括浙江、福建等 6 省区, 这些地区碳排放量本身不高, 但在既定投入与期望产出下仍有一定数量的无效排放, 同样有必要通过优化农业化学品投入结构、改进废弃物处理方式等途径实现农业碳排放效率的改善。

对比可见, 农业碳排放总量指标的单一性较强, 不应作为评价各地农业低碳化水平的唯一维度, 而

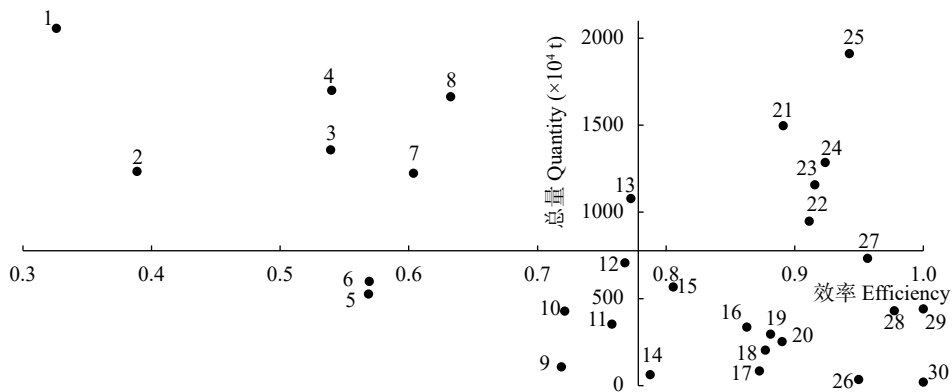


图 2 基于农业碳排放总量与效率双重维度的省域类别划分

Fig. 2 Classification of the 30 provinces (cities, autonomous regions) of China based on the dual dimension of quantity and efficiency of agricultural carbon emissions

1: 湖南; 2: 江西; 3: 湖北; 4: 安徽; 5: 福建; 6: 浙江; 7: 广东; 8: 江苏; 9: 宁夏; 10: 陕西; 11: 山西; 12: 云南; 13: 四川; 14: 天津; 15: 辽宁; 16: 重庆; 17: 上海; 18: 海南; 19: 贵州; 20: 甘肃; 21: 山东; 22: 河北; 23: 广西; 24: 黑龙江; 25: 河南; 26: 北京; 27: 吉林; 28: 新疆; 29: 内蒙古; 30: 青海。 1: Hunan; 2: Jiangxi; 3: Hubei; 4: Anhui; 5: Fujian; 6: Zhejiang; 7: Guangdong; 8: Jiangsu; 9: Ningxia; 10: Shaanxi; 11: Shanxi; 12: Yunnan; 13: Sichuan; 14: Tianjin; 15: Liaoning; 16: Chongqing; 17: Shanghai; 18: Hainan; 19: Guizhou; 20: Gansu; 21: Shandong; 22: Hebei; 23: Guangxi; 24: Heilongjiang; 25: Henan; 26: Beijing; 27: Jilin; 28: Xinjiang; 29: Inner Mongolia; 30: Qinghai.

农业碳排放效率指标能在考虑各地要素禀赋与农业产出的情况下,更加全面地反映各地区农业生产碳排放绩效,对于制定低碳农业经济政策更具参考价值。

2.2 中国农业碳排放效率的空间溢出与影响因素分析

为厘清中国农业碳排放效率的影响因素及可能

存在的溢出效应,根据前文所设变量构建计量模型,以探明显著影响效率的关键因素并分析其作用机理。

2.2.1 农业碳排放效率空间相关性检验

首先对 2000—2019 年中国农业碳排放效率的全局 Moran's I 进行测算,以验证效率是否存在空间自相关,结果如表 4 所示。

表 4 2000—2019 年中国农业碳排放效率 Moran's I 测算结果
Table 4 Moran's I of agricultural carbon emissions efficiency in China from 2000 to 2019

年份 Year	Moran's I	z	P	年份 Year	Moran's I	z	P
2000	0.359	4.069	0.000	2010	0.225	2.710	0.003
2001	0.337	3.859	0.000	2011	0.272	3.211	0.001
2002	0.393	4.459	0.000	2012	0.245	2.952	0.002
2003	0.406	4.584	0.000	2013	0.259	3.067	0.001
2004	0.315	3.648	0.000	2014	0.200	2.456	0.007
2005	0.304	3.524	0.000	2015	0.290	3.425	0.000
2006	0.298	3.454	0.000	2016	0.322	3.737	0.000
2007	0.225	2.699	0.003	2017	0.303	3.561	0.000
2008	0.213	2.566	0.005	2018	0.257	3.146	0.001
2009	0.189	2.322	0.010	2019	0.041	0.842	0.200

从绝对值来看,除 2019 年外,其余年份的中国农业碳排放效率全局 Moran's I 均在 $P < 1\%$ 显著性水平下通过 z 检验,且数值大多处于 0.2~0.4,表明我国农业碳排放效率存在显著空间自相关性,整体表现为较强聚集效应。农业碳排放效率是由产业结构、生产要素组合和技术水平所决定的,而邻近地区处于同一气候带的可能性较高,加之资源禀赋、生产环境相近,种植制度、产业结构存在一定程度的同质性,也为农业技术应用的相似性提供了基础条件,导致邻近省区间农业碳排放量与生产系统的关系形成趋同现象。

从变化过程来看,2000 年,全局 Moran's I 值为 0.359,到 2019 年降至 0.041,呈波动下降态势,表明空间集聚效应随时间推移逐渐减弱,空间自相关程度越来越低。随着经济发展与环境压力的矛盾愈发突出,各地对农业减排增汇的认知日益深入,并陆续制定了较具针对性的环境保护政策与低碳农业发展规划,但由于经济结构、所处阶段和发展定位存在一定差异,不同地区所选路径的地域特征开始凸显,呈现出多样化发展趋势,导致农业碳排放效率的独立性逐渐增强。

2.2.2 空间计量模型设定、估计与检验

由于农业碳排放效率存在空间关联,在分析影响因素时有必要考虑邻近地区间的交互作用,需选择适用模型将空间地理要素引入计量分析。运用 Stata 15.1 软件,对基础等式进行 OLS 回归,再基于距离平方倒数权重矩阵 (W_0) 对残差进行空间相关性的

LM 检验和稳健 LM 检验,发现 LM Error 与 LM Lag 统计量分别为 28.073 和 50.778,稳健的 LM Error、LM Lag 统计量依次是 8.085 与 30.791,均在 $P < 1\%$ 的显著性水平上拒绝原假设,空间滞后效应和空间误差效应同时存在,需首先考虑采用空间杜宾模型 (SDM)。为保证估计结果的稳健性,同时基于 0-1 邻接权重矩阵 (W_1) 与距离倒数权重矩阵 (W_2) 进行 SDM 估计作为对照,Hausman 检验结果显示应选用固定效应模型,估计结果如表 5 所示。

表 5 显示,就解释变量系数的符号、大小和显著性而言,基于不同权重矩阵的估计结果表现相对一致,说明结果具有较强的稳健性。Wald-lag、Wald-err、LR-lag 和 LR-err 检验均拒绝 SDM 退化为 SAR 或 SEM 的原假设,说明 SDM 是最为适用的模型。在 SDM(W_0) 模型估计结果中,空间自回归系数 ρ 为 0.185,且在 $P < 1\%$ 的显著性水平下通过 z 检验,表明农业碳排放效率存在正向溢出效应,邻近省份的效率每提高 1%,将带动本省效率增加 0.185%,地区间农业碳排放效率呈良性互动的演进特征。

2.2.3 影响因素的直接影响与溢出效应分析

由于存在空间滞后项,回归系数无法描述解释变量对被解释变量的影响,需基于 SDM(W_0) 估计结果的方差-协方差矩阵对各解释变量的总效应、直接效应和溢出效应进行计算与分解,结果如表 6 所示。

首先观察总效应,农业产业结构、农业投资强度、受灾程度和城镇化率 4 个变量的系数分别在 $P < 1\%$ 或 $P < 5\%$ 的显著性水平上通过 z 检验,依次为

表 5 农业碳排放效率影响因素的空间计量模型估计结果
Table 5 Estimation of influencing factors of the agricultural carbon emissions efficiency based on spatial econometric model

变量 Variable	SDM (W_0)		SDM (W_1)		SDM (W_2)	
	系数 Coefficient	z-statistics	系数 Coefficient	z-statistics	系数 Coefficient	z-statistics
Ind	-0.986***	-3.06	-0.718**	-2.14	-1.385***	-2.97
cro	-0.237	-1.15	-0.212	-1.03	-0.126	-0.65
agg	-0.006	-0.27	0.016	0.78	0.001	0.05
ln(lan)	0.113	1.53	0.019	1.00	0.003	0.16
ln(cap)	-0.049***	-2.92	-0.015	-0.47	-0.084	-0.65
ln(tec)	-0.037	-1.01	-0.040	-1.02	-0.025	-0.64
irr	0.297**	2.09	0.268**	2.06	0.248*	1.80
dis	-0.070**	-2.14	-0.082***	-2.66	-0.066**	-2.13
urb	0.113*	1.77	0.109*	1.78	0.067	1.09
fis	-0.753***	-3.01	-0.393	-1.50	-0.840***	-3.52
W×ind	0.460*	1.92	0.368*	1.83	0.341	1.33
W×cro	0.783*	1.80	0.626*	1.64	1.055	1.42
W×agg	-0.022	-0.39	-0.048	-1.07	-0.122	-0.80
W×ln(lan)	0.040	0.93	-0.038*	-1.77	-0.055**	-2.28
W×ln(cap)	0.010	0.58	0.111	1.46	0.113	1.52
W×ln(tec)	0.087	0.94	0.018	0.33	-0.048	-0.24
W×irr	-0.257	-1.52	-0.178	-1.45	-0.370	-1.14
W×dis	-0.079	-1.63	-0.018	-0.41	-0.220**	-2.38
W×urb	0.234*	1.77	0.173*	1.75	0.419**	2.26
W×fis	0.503	1.55	-0.082	-0.30	0.617	1.52
ρ	0.185**	2.10	0.254***	4.44	0.320***	3.22
Hausman	33.65***		32.32***		37.25***	
Wald-lag	63.28***		56.00***		43.71***	
Wald-err	58.88***		48.91***		40.04***	
LR-lag	60.24***		53.51***		42.50***	
LR-err	58.41***		49.07***		41.04***	
R^2	0.2592		0.2530		0.2449	
Log-pseudolikelihood	692.7242		697.6138		690.8701	
observations	600		600		600	

*、**和***分别表示估计系数通过 $P<10\%$ 、 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 显著性水平下的z检验。各变量的意义见表2。*, ** and *** indicate that the estimated coefficients pass the z-test at $P<10\%$, $P<5\%$, and $P<1\%$ levels of significance, respectively. The meaning of each variable is shown in the table 2.

表 6 农业碳排放效率影响因素的总效应、直接效应及溢出效应
Table 6 Total, direct and spillover effects of influencing factors of agricultural carbon emissions efficiency

变量 Variable	总效应 Total effect		直接效应 Direct effect		溢出效应 Spillover effect	
	系数 Coefficient	z-statistics	系数 Coefficient	z-statistics	系数 Coefficient	z-statistics
ind	-0.656**	-2.25	-1.093***	-3.06	0.437*	1.83
cro	0.749	1.47	-0.219	-1.12	0.969*	1.73
agg	-0.035	-0.48	-0.005	-0.24	-0.030	-0.43
ln(lan)	0.188*	1.68	0.116*	1.68	0.072	1.29
ln(cap)	-0.049**	-2.54	-0.058***	-3.07	0.008	0.52
ln(tec)	0.065	0.49	-0.032	-0.83	0.096	0.85
irr	0.094	0.34	0.290**	2.11	-0.196	-0.85
dis	-0.188***	-2.95	-0.075**	-2.38	-0.113**	-1.96
urb	0.441***	2.94	0.127**	2.03	0.314**	2.08
fis	-0.334	-0.95	-0.738***	-2.99	0.404	1.15

*、**和***分别表示估计系数通过 $P<10\%$ 、 $P<5\%$ 和 $P<1\%$ 显著性水平下的z检验。各变量的意义见表2。*, ** and *** indicate that the estimated coefficients pass the z-test at $P<10\%$, $P<5\%$, and $P<1\%$ levels of significance, respectively. The meaning of each variable is shown in the table 2.

-0.656、-0.049、-0.188 和 0.441, 尤其是受灾程度和城镇化率的直接效应与溢出效应同时显著, 表明其为农业碳排放效率的关键影响因素, 围绕这两项指

标进行针对性政策调整, 可在提高本省农业碳排放效率的同时, 带动其他地区共同推进农业减排进程。从直接效应来看, 农业产业结构、农业投资强

度和财政支农力度 3 个变量的系数在 $P < 1\%$ 显著性水平上通过 z 检验, 系数分别为 -1.093 、 -0.058 和 -0.738 。农业产业结构变量的系数为负, 这意味着农业产值占农林牧渔总产值的比重越大, 农业碳排放效率越低。一个合理的解释是, 尽管作物种植具有碳汇效应, 但农业生产同样依赖于化学用品及化石能源的使用, 这往往伴随大量温室气体排放, 是农林牧渔各部门中的最大排放源, 成为导致农业碳排放效率变化的重要原因。农业投资强度负向影响农业碳排放效率, 推测是由于当前农业固定资产投资的重点领域主要在基础设施、农业机械设备的购置上, 随着固定资产投入的增长, 农业生产机械设备购置量不断增加, 直接带动农用能源碳排放量迅速增长。财政支农力度也将对农业碳排放效率形成显著负向影响, 这是因为财政支农力度的提高将使经营主体对作物种植形成相对稳定的收益预期, 激发其加大对农资、机械等生产要素的投入力度, 导致农业碳排放量的增加。有效灌溉率、受灾程度和城镇化率 3 个变量的系数在 $P < 5\%$ 显著性水平上通过 z 检验, 系数值依次是 0.290 、 -0.075 和 0.127 。农业灌溉的影响具有双重性: 一方面, 灌溉过程将利用电能间接消耗化石燃料并产生碳排放, 直接增加非期望产出, 但灌溉所导致的碳排放量较小, 在农业碳排放结构中的占比很低; 而另一方面, 灌溉是农用生产的必要投入, 有效灌溉率的提高意味着技术进步与农田水利设施的改善, 其覆盖面与规模将直接影响作物的产出和收益, 农业碳排放效率由投入、期望产出和碳排放量共同决定, 取决于增产与增排两种力量的对比, 从结果来看, 有效灌溉率的直接影响表现为正, 表明其对作物产出和经济效益的正面作用较增排效应更为显著。受灾程度对农业碳排放效率呈显著负向作用, 尽管受灾程度的提高将直接减少作物播种面积而缩减农业碳排放规模, 但同时也将严重影响农业生产效益, 更重要的是, 农田大面积损坏将直接影响农业生产根基, 总体对农业碳排放效率表现为消极影响。最后, 城镇化进程的推进将带动过剩农业劳动力转移至非农行业, 有利于农业生产规模化、集约化程度的提高, 在优化农业产业结构与资源配置效率的同时, 产生规模经济效应, 使得单位碳排放所对应的农业产出不断增加成为可能, 有利于农业碳排放效率的提升。

从溢出效应来看, 受灾程度和城镇化率 2 个变量的系数在 $P < 5\%$ 的显著性水平上通过 z 检验, 系数分别为 -0.113 和 0.314 ; 农业灾害的主要类型为洪涝、

干旱等, 并非仅涉及个别省份, 而是覆盖某片区域, 导致地区间的农业受灾程度具有较强相关性, 当邻近省份受灾严重时, 本省也可能受到农业灾害波及, 对农业碳排放效率形成消极影响。城镇化是技术进步的过程, 其进程中积累的人力资本及产生的技术进步效应亦会外溢扩散至农业部门, 对邻近地区同样具有辐射作用, 有利于区域农业碳排放效率的协同提升。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究基于全要素生产框架搭建了农业碳排放效率理论模型, 采用考虑非期望产出的全局参比 SBM 方法测算 2000—2019 年间中国 30 省(市、自治区)农业生产过程中的碳排放松弛量, 根据碳排放实际值与松弛量计算农业碳排放效率, 再对不同时期、地区的效率呈现结果进行分析, 最后运用空间杜宾模型从产业、要素、环境 3 个维度探讨农业碳排放效率的影响因素, 结论如下:

1) 考察期间, 中国农业碳排放效率的平均水平为 0.778 , 具备较大减排潜力。从省级层面来看, 农业碳排放效率具有差异化、地域化特征, 仅内蒙古和青海两地农业碳排放效率达到 1.000 , 其余地区在现有资源禀赋和农业生产结构下均存在不同程度的减排空间。从效率增速来看, 我国绝大多数地区的农业碳排放效率增长率为正, 表明整体处于自高碳农业向低碳农业的转型阶段。根据总量与效率的呈现结果, 可将 30 省(市、自治区)分为高排高效区(河南、河北等 5 省区)、低排高效区(内蒙古、甘肃等 12 省区)、高排低效区(湖南、湖北等 7 省区)和低排低效区(浙江、福建等 6 省区)。

2) 中国农业碳排放效率的全局 Moran's I 大体处于 $0.2 \sim 0.4$ ($P < 0.01$), 说明效率整体表现为正向空间自相关, 存在较强空间聚集效应。随着时间推移, 全局 Moran's I 呈波动下降态势, 表明空间关联随时间推移逐渐减弱。

3) 农业碳排放效率具有正向空间溢出效应, 表明邻近地区之间的农业碳排放效率呈良性互动的演进特征。从各影响因素的直接效应来看, 本省的农业产业结构、农业投资强度、财政支农力度和受灾程度对本省农业碳排放效率存在显著消极影响, 有效灌溉率和城镇化率则表现为显著正向作用; 从溢出效应来看, 邻近地区的受灾程度将负向影响本省农业碳排放效率, 而城镇化率则表现为促进作用。

3.2 建议

根据以上结论,本文提出以下建议:

1) 关注农业减排重点区域,制定全局农业减排增效方案。不同地区所肩负的农业生产责任有所区别,应尊重农业碳排放效率的地域差异化特征,农业大省涉及大量农资与能源使用,势必会产生较高碳排放量,而北京、上海等非农业重点区域的碳排放量本就较低。因此,高排高效区与低排高效区均为相对理想的状态,各省应在考虑农业发展水平与资源禀赋的前提下,根据自身定位与发展特征,学习先进省份的方案措施,如高排低效农业大省可参考效仿河南、山东等高排高效样本省份的低碳农业发展经验,努力向对应类别靠拢;而湖南、湖北等高排低效省区具备农业碳排放总量基数大与可削减比例高的特性,应在制定全局减排方案时予以重点关注。

2) 重视农业碳排放效率的关键影响因素。应提高农业固定资本投入的精准性、针对性,鼓励投资主体增加对农业减排增效技术、设施、装备的投入。尝试向低碳农业技术的研发与推广等投入更多财政资金,加强农田水利基础设施的建设,加快完善农业抗灾政策、提高抗灾能力。探索构建科学合理的农业碳补偿机制,对低碳农业生产主体进行补贴。

3) 充分利用空间溢出效应,协同推进区域农业减排进程。加强省际合作,鼓励高效省份向周边地区分享兼顾经济产出和减源增汇的农业发展经验举措,充分发挥城镇化进程中的正向辐射作用,破除受灾程度等负向影响因素的连锁作用。省区间联合探索多元化农业低碳发展路径,利用农业碳排放效率的正向溢出效应缩小地区效率差距,协同实现区域农业低碳转型。

参考文献 References

- [1] JIA G S, SHEVLIKOVA E, ARTAXO P, et al. Land-climate interactions [R/OL]. IPCC special report on climate change and land. [2019-09-16]. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-2/>.
- [2] 李涛, 傅强. 中国省际碳排放效率研究[J]. *统计研究*, 2011, 28(7): 62-71
LI T, FU Q. Study on China's carbon dioxide emissions efficiency[J]. *Statistical Research*, 2011, 28(7): 62-71
- [3] ZHOU P, ANG B W, HAN J Y. Total factor carbon emission performance: a Malmquist index analysis[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 194-201
- [4] 王群伟, 周鹏, 周德群. 我国二氧化碳排放绩效的动态变化、区域差异及影响因素[J]. *中国工业经济*, 2010, (1): 45-54
WANG Q W, ZHOU P, ZHOU D Q. Research on dynamic carbon dioxide emissions performance, regional disparity and affecting factors in China[J]. *China Industrial Economics*, 2010, (1): 45-54
- [5] CAO H J, LI H C, CHENG H Q, et al. A carbon efficiency approach for life-cycle carbon emission characteristics of machine tools[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 37: 19-28
- [6] LIN B Q, DU K R. Energy and CO₂ emissions performance in China's regional economies: Do market-oriented reforms matter?[J]. *Energy Policy*, 2015, 78: 113-124
- [7] 王少剑, 高爽, 黄永源, 等. 基于超效率SBM模型的中国城市碳排放绩效时空演变格局及预测[J]. *地理学报*, 2020, 75(6): 1316-1330
WANG S J, GAO S, HUANG Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and trend prediction of urban carbon emission performance in China based on super-efficiency SBM model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(6): 1316-1330
- [8] 张伟, 朱启贵, 李汉文. 能源使用、碳排放与我国全要素减排效率[J]. *经济研究*, 2013, 48(10): 138-150
ZHANG W, ZHU Q G, LI H W. Energy use, carbon emission and China's total factor carbon emission reduction efficiency[J]. *Economic Research Journal*, 2013, 48(10): 138-150
- [9] 刘婕, 魏玮. 城镇化率、要素禀赋对全要素减排效率的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(8): 42-48
LIU J, WEI W. Impact of urbanization level and endowment disparity on carbon reduction efficiency[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(8): 42-48
- [10] 吴贤荣, 张俊飏, 田云, 等. 中国省域农业碳排放: 测算、效率变动及影响因素研究——基于DEA-Malmquist指数分解方法与Tobit模型运用[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 129-138
WU X R, ZHANG J B, TIAN Y, et al. Provincial agricultural carbon emissions in China: calculation, performance change and influencing factors[J]. *Resources Science*, 2014, 36(1): 129-138
- [11] LIN B Q, FEI R L. Regional differences of CO₂ emissions performance in China's agricultural sector: a Malmquist index approach[J]. *European Journal of Agronomy*, 2015, 70: 33-40
- [12] 高鸣, 宋洪远. 中国农业碳排放绩效的空间收敛与分异——基于Malmquist-luenberger指数与空间计量的实证分析[J]. *经济地理*, 2015, 35(4): 142-148, 185
GAO M, SONG H Y. Dynamic changes and spatial agglomeration analysis of the Chinese agricultural carbon emissions performance[J]. *Economic Geography*, 2015, 35(4): 142-148, 185
- [13] 田云, 王梦晨. 湖北省农业碳排放效率时空差异及影响因素[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(24): 5063-5072
TIAN Y, WANG M C. Research on spatial and temporal difference of agricultural carbon emission efficiency and its influencing factors in Hubei Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(24): 5063-5072
- [14] 吴昊玥, 何艳秋, 陈柔. 中国农业碳排放绩效评价及随机性收敛研究——基于SBM-Undesirable模型与面板单位根检验[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(9): 1381-1391
WU H Y, HE Y Q, CHEN R. Assessment of agricultural carbon emission performance and stochastic convergence in China using SBM-Undesirable model and panel unit root test[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(9): 1381-1391

- [15] 李波, 王春好, 张俊飏. 中国农业净碳汇效率动态演进与空间溢出效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(12): 68-76
LI B, WANG C Y, ZHANG J B. Dynamic evolution and spatial spillover of China's agricultural net carbon sink[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(12): 68-76
- [16] QIN Q D, YAN H M, LIU J, et al. China's agricultural GHG emission efficiency: regional disparity and spatial dynamic evolution[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020: 1-17
- [17] WANG R, FENG Y. Research on China's agricultural carbon emission efficiency evaluation and regional differentiation based on DEA and Theil models[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2020, 18(6): 1-12
- [18] ANSELIN L. The scope of spatial econometrics[M]//Spatial Econometrics: Methods and Models. Dordrecht: Springer Netherlands, 1988: 7-15
- [19] FÄRE R, GROSSKOPF S, LOVELL C A K, et al. Multilateral productivity comparisons when some outputs are undesirable: a nonparametric approach[J]. The Review of Economics and Statistics, 1989, 71(1): 90-98
- [20] ZHOU P, ANG B W, WANG H. Energy and CO₂ emission performance in electricity generation: a non-radial directional distance function approach[J]. European Journal of Operational Research, 2012, 221(3): 625-635
- [21] PASTOR J T, LOVELL C A K. A global Malmquist productivity index[J]. Economics Letters, 2005, 88(2): 266-271
- [22] TONE K. Dealing with undesirable outputs in DEA: A slacks based measure (SBM) approach[R]. Tokyo: GRIPS Research Report Series, 2003
- [23] HUANG J H, YANG X G, CHENG G, et al. A comprehensive eco-efficiency model and dynamics of regional eco-efficiency in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 67: 228-238
- [24] 全良, 张敏, 赵凤. 中国工业绿色全要素生产率及其影响因素研究——基于全局SBM方向性距离函数及SYS-GMM模型[J]. 生态经济, 2019, 35(4): 39-46
QUAN L, ZHANG M, ZHAO F. Research on China's industrial green total factor productivity and its influencing factors: Based on Global SBM directional distance function and SYS-GMM model[J]. Ecological Economy, 2019, 35(4): 39-46
- [25] HU J L, WANG S C, YEH F Y. Total-factor water efficiency of regions in China[J]. Resources Policy, 2006, 31(4): 217-230
- [26] 刘华军, 孙淑惠, 李超. 环境约束下中国化肥利用效率的空间差异及分布动态演进[J]. 农业经济问题, 2019, 40(8): 65-75
LIU H J, SUN S H, LI C. Regional difference and dynamic evolution of fertilizer use efficiency in China under environmental constraints[J]. Issues in Agricultural Economy, 2019, 40(8): 65-75
- [27] 李谷成. 中国农业的绿色生产率革命: 1978—2008年[J]. 经济学: 季刊, 2014, 13(2): 537-558
LI G C. The green productivity revolution of agriculture in China from 1978 to 2008[J]. China Economic Quarterly, 2014, 13(2): 537-558
- [28] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013
- [29] 闵继胜, 胡浩. 中国农业生产温室气体排放量的测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(7): 21-27
MIN J S, HU H. Calculation of greenhouse gases emission from agricultural production in China[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(7): 21-27
- [30] 程琳琳. 中国农业碳生产率时空分异: 机理与实证[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 49-56
CHENG L L. Spatial and temporal differentiation of China's agricultural carbon productivity: mechanism and demonstration[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 49-56
- [31] 田云, 张俊飏. 中国农业生产净碳效应分异研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(8): 1298-1309
TIAN Y, ZHANG J B. Regional differentiation research on net carbon effect of agricultural production in China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(8): 1298-1309
- [32] 程琳琳, 张俊飏, 何可. 农业产业集聚对碳效率的影响研究: 机理、空间效应与分群差异[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(9): 218-230
CHENG L L, ZHANG J B, HE K. Different spatial impacts of agricultural industrial agglomerations on carbon efficiency: Mechanism, spatial effects and groups differences[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(9): 218-230